



ILMATIETEEN LAITOS

Ahdinaltaan aallokko
Raportti syksyn 2018 mittaustuloksista

Jan-Victor Björkqvist

18.2.2019, Ilmatieteen laitos

Ilmatieteen laitos
Erik Palménin aukio 1, PL 503
00101 Helsinki
www.fmi.fi

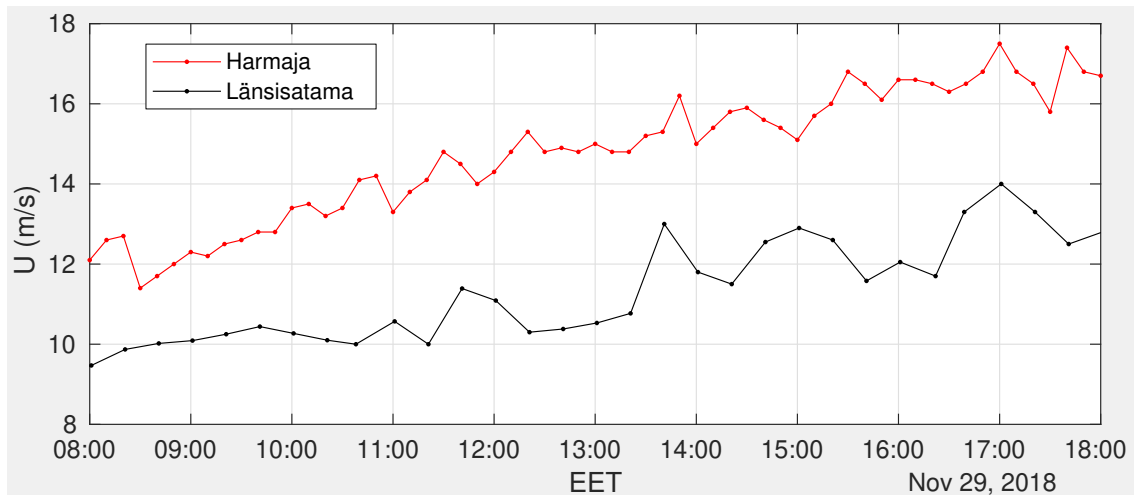
Tiivistelmä

Ahdinaltaan muutostöissä on noussut tarve saada tietoa siellä vallitsevasta aallokosta. Eriytyisen haastavaksi tekee altaan kapeneva muoto ja jyrkät heijastavat seinät, sillä nämä vahvistavat altaaseen kulkeutuvia aaltoja. Vuonna 2012 Melkinlaiturin kärjessä tehtyjen mittausten perusteella on todettu, että vaimennuskammioitakaan eivät täysin pysty estämään aallokon heijastumista. Lisäksi näitä kammioita on vain osassa altaan seinämissä.

Vuonna 2018 Ilmatieteen laitos suoritti Helsingin kaupungin tilauksesta aaltomittauksia Ahdinaltaalla. Mittaukset suoritettiin laiturin seinän kohdalla ohuella langalla. Samanlaisesti Lauttasaarenselälle ankkuroitu poiju mittasi altaan edustan heijastamatonta aallokkoa. Mittaukset suoritettiin 29.11.2018 viidessä pisteessä kovan lounaistuulen vallitessa. Itse mittaustyöhön osallistuivat Jan-Victor Björkqvist (Ilmatieteen laitos) ja Kimmo Kahma (Akateemiset Konsultit Oy).

Mittauksissa todettiin, että Melkinlaiturin reunalla poijun mittaama aallokko on voimakkaasti heijastunut. Tilanne on hieman parempi Melkinlaiturin eteläosassa, mihin on asennettu vaimennuskammioita, sillä ne pystyvät mittausten perusteella poistamaan osan aallokon heijastuksista. Luoteisnurkassa suoritettut mittaukset osoittivat, että aallokko on siellä tietyillä periodeilla vaimentunut ja toisilla periodeilla vahvasti heijastunut. Myös harjakorjaus altaan perällä nousee mittauksissa huomattavasti korkeammalle kuin mitä normaalisti olisi odotettavissa saman merkitsevän aallonkorkeuden vallitessa; tätä johtopäätöstä tukevat myös visuaaliset havainnot. Ahdinaltaan itäreunalla laiturin alla olevat rakennelmat vaimentavat lyhyimpiä aaltoja, mutta eivät poista heijastuksia kokonaan. Myös tässä paikassa aallokko on heijastunut.

Altaan merkitsevän aallokorkeuden arvioitiin voivan nousta jopa 1.8 metriin, joten altaan aalto-olosuhteet ovat pahemmat kuin ulompana Lauttasaarenselällä, ja aallot ovat moninkertaisesti korkeammat verrattuna esim. Kauppatoriin. Ahdinaltaalle tunkeutuu myös jopa 30 metriä pitkiä aaltoja, jotka voivat liikuttaa tätä lyhyempiä kelluvia rakenteita ja laivoja.



Kuva 1: 10 minuutin keskituulen nopeus mittausajanjaksolla.

1 Sääolosuhteet

Mittauspäivän ajalta oli käytössä tuulitiedot Ilmatieteen laitoksen Harmajan operatiiviselta säähavaintoasemalta. Lisäksi Helsingin sataman luvalla oli tallennettu myös Länsisataman vallitsevat tuulitiedot 20 minuutin välein, jotka päivittyvät reaaliaikaisesti Helsingin sataman sivuille ([linkki](#)). Harmajan kovin 10 minuutin keskituuli mittausajanjaksolla oli 17.5 m/s. Vastaava luku Länsisatamassa oli 14.0 m/s. Molempien paikkojen 10 minuutin keskituuli on kuvattu kuvassa 1.

Aallokko Länsisataman edustalla mitattiin Lauttasaarenselälle ankkuroidulla tutkimuspoijulla (kuva 2). Poiju oli ankkuroitu paikkaan $60^{\circ} 08.60' N$, $24^{\circ} 53.89' E$, missä vesisyvyys on noin 13 metriä. Poijuspektrit käsiteltiin poistamalla GPS-anturista johtuvaa virheellistä matalataajuista energiaa (Björkqvist *et al.*, 2016). Poijun mittaama merkitsevä aallokorkeus oli Ahdinaltaan mittausten aikana 0.4–0.5 metriä (kuva 3). Suurin osa aallokon energiasta poijulla oli periodivälillä 2–5 sekuntia, eli aallonpituuksina ilmaistuna noin 6–40 metriä. Aallokon hallitseva suunta poijulla oli noin 160 astetta.

Suomenlinnan poiju oli valitettavasti nostettu ennen mittauksia, mutta numeerisen WAM-mallin mukaan merkitsevä aallonkorkeus mittausten ajan oli Suomenlinnan poijulla noin 1 m. Ilmatieteen laitoksen operatiivinen aaltopoiju keskellä Suomenlahtea mittasi samanaikaisesti 2.0-2.5 metrin merkitsevän aallonkorkeuden.

Helsingin mareografin vedenkorkeus keskiveden suhteen oli mittausten ajan -14 ja -9 cm välillä (+6 ja +10 cm välillä N2000-järjestelmässä).

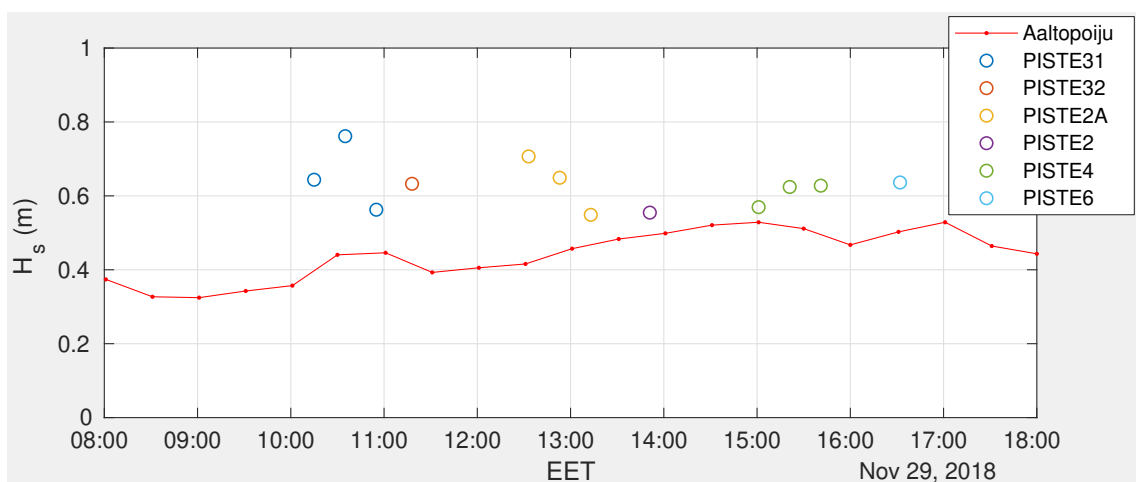
2 Tulokset

2.1 Merkitsevä aallonkorkeus

Mittauksia kapasitiivisella langalla suoritettiin laiturista käsin viidessä eri paikassa (kuva 2). Mittaamalla aallokkoa aivan kiinni laiturissa saadaan mittauksiin mahdollinen aallokon heijastuminen. Mittausjärjestely on samantapainen kuin se, millä aallokon heijastusta mitattiin Melkinlaiturin kärjessä vuonna 2012 (Björkqvist *et al.*, 2017). Valokuva mittausjärjestelystä löytyy kuvasta 4.



Kuva 2: Aaltopoiijujen paikka (tähti) ja lankamittarilla suoritettujen mittauspisteiden paikat vuonna 2018 (ympyrät). Kartta-aineisto haettu sivustolta <https://kartta.hel.fi>.



Kuva 3: Mitattu merkitsevä aallonkorkeus poiijulla (punainen viiva) ja Ahdinaltaalla lankamittarilla mitattuna (ympyrät).



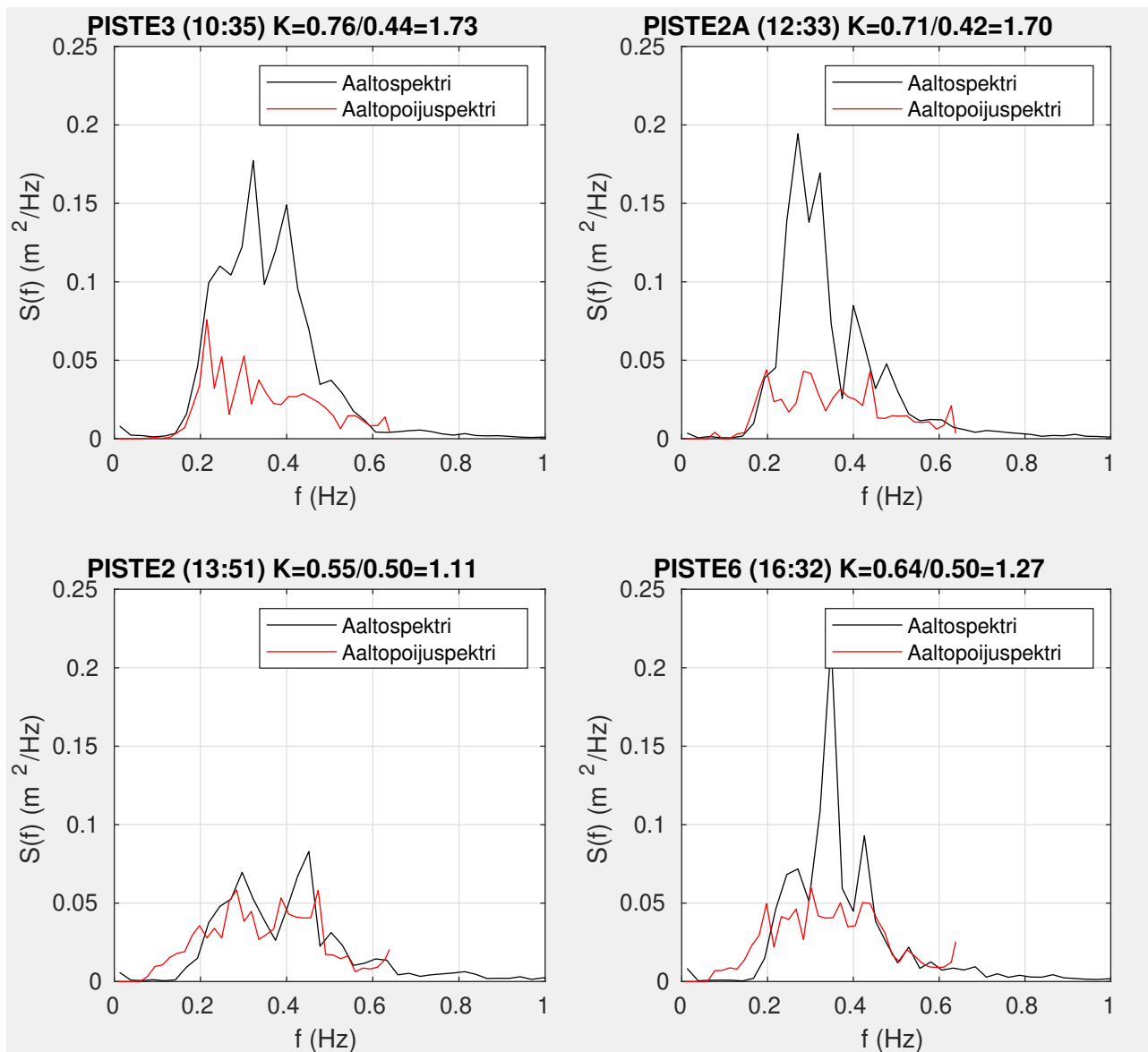
Kuva 4: Mittausjärjestely pisteessä 4. Valokuva: Kimmo Kahma.

Merkitsevä aallonkorkeus, H_s , Ahdinaltaassa tehdyistä lankamittauksista laskettuna oli 0.55–0.71 metriä ja heijastuserroin Lauttasaarenselän poijuun verrattuna, K , oli 1.08–1.80. Mittaustulokset on koottu taulukkoon 1.

Kuvassa 5 näytetään neljä valittua spektriä pisteiltä 3, 2A, 2 ja 6. Kuvasta näkyy, että pisteessä 3 aallokko on hyvin voimakkaasti heijastunut. Spektri kuvastaa aallokon energiaa, joten täysi heijastus näkyisi spektrin arvojen nelinkertaistumisena. Kokonaisaallonkorkeuden suhde on $K=1.7$, mikä on erittäin lähellä kokonaan heijastuneen aallokon suhdetta $K=2.0$. Pisteessä 2A (noin 80 metriä Melkinlaituria merelle päin) aallokon heijastus on hyvin samantapainen kuin pisteessä 3. Varsinkin noin 4 sekunnin aallot ovat käytännössä täysin heijastuneita. Heijastuserroin on tässäkin pisteessä $K=1.7$.

Siirryttäessä edelleen noin 40 metriä laituria pistin pisteelle 2 vähenee aallokon heijastus huomattavasti, eikä lankamittarilla mitattu spektri ole juurikaan heijastunut ($K=1.1$). Huomattavaa kuitenkin on, että tässäkin pisteessä aallokko on kuitenkin kovempaa kuin keskellä Lauttasaarenselkää. Ahdinaltaan itäisellä laiturilla (piste 6) aallokko on myös vaimentunut, joskaan ei aivan yhtä paljon ($K=1.3$). Syynä matalampaan aallonkorkeuteen voi olla hieman suojaisempi paikka, johon aallokko joutuu pääosin kulkeutumaan läntisen laiturin ja muiden seinien heijastusten kautta. Myös laiturin alle tehdyt ontot rakennelmat tappavat todennäköisesti aaltoja jonkun verran. On huomattavaa, että noin 3 sekunnin aallot ovat pisteessä 6 täysin heijastuneita. Kapean taajuuskaistan täysi heijastus viittaa siihen, että altaan muoto ohjaa tietynpituisia aaltoja heijastusten kautta tiettyihin pisteisiin heijastusten ja mahdollisten resonointien kautta.

Piste 4 sijaitsee altaan pohjukassa. Toiveena oli mitata aallokkoa aivan altaan kulmassa. Tämä osoittautui kuitenkin mahdottomaksi, sillä altaan nurkkaan oli kerääntynyt suuri määrä roskaa joka olisi voinut rikkoa mittalaitteen. Vaikka merkitsevän aallonkorkeuden kokonaisheijastus ($K=1.2$) jää alhaisemmaksi kuin pisteessä 3, on heijastus hyvin riippuvai-



Kuva 5: Neljä aaltospektriä Ahdinaltaan eri pisteillä (musta) verrattuna Lauttasaarenselän aaltopöijällä mitattuun spektriin (punainen). K on merkitsevän aallonkorkeuden heijastuskerroin.

		Lauttasaarenselkä		Ahdinallas				Harmaja	Länsisatama
EET	Piste	H_s (m)	T_p (s)	H_s (m)	T_p (s)	z_{max} (m)	K	U (m/s)	U (m/s)
10:15	PISTE3	0.36	5.2	0.64	3.2	0.71	1.80	13.8	10.0
10:35	PISTE3	0.44	4.7	0.76	3.1	0.69	1.73	13.8	10.4
10:55	PISTE3	0.45	4.4	0.56	2.4	0.71	1.26	13.9	10.2
11:18	PISTE3	0.39	2.2	0.63	2.3	0.76	1.61	14.6	11.2
12:33	PISTE2A	0.42	5.1	0.71	3.7	0.67	1.70	14.9	10.5
12:53	PISTE2A	0.46	2.6	0.65	3.1	0.69	1.42	14.8	10.7
13:13	PISTE2A	0.46	2.6	0.55	2.9	0.65	1.20	15.2	12.1
13:51	PISTE2	0.50	3.6	0.55	2.3	0.64	1.11	15.4	11.7
15:01	PISTE4	0.53	3.8	0.57	2.5	0.66	1.08	16.1	12.6
15:21	PISTE4	0.51	2.6	0.62	2.3	0.85	1.22	16.5	11.6
15:41	PISTE4	0.51	2.6	0.63	2.4	0.63	1.23	16.6	12.1
16:32	PISTE6	0.50	3.3	0.64	2.9	0.65	1.27	16.9	13.7

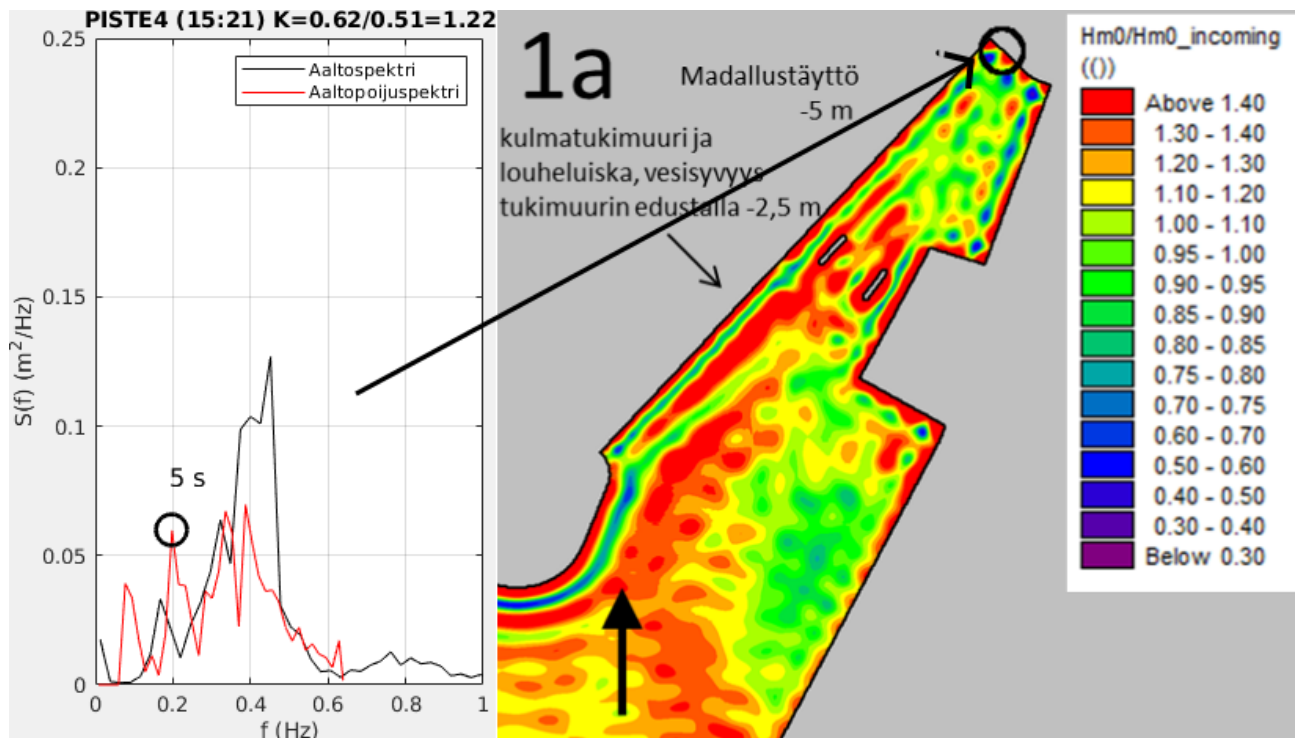
Taulukko 1: Mittaustulokset Ahdinaltaan aaltomittauksista. Taulukossa näkyy merkitsevä aallonkorkeus (H_s); modaaliperiodi (T_p); korkein harjakorkeus, eli vedenpinnan maksimaalinen nousu tyynen vedenpinnan yläpuolelle (z_{max}); merkitsevän aallonkorkeuden heijastuskerroin verrattuna Lauttasaarenselän poijumittauksiin (K); ja tuulen nopeus (U).

nen aallokon periodista. Kuvasta 6 (vasen) ilmenee selvästi miten viiden sekunnin aallot ovat Lauttasaarenselän pojuun verrattuna vaimentuneet. Myös 0.6 Hz kohdalla on pisteen 4 aaltospektrissä kuoppa. Noin 2.5 sekunnin aallot ovat taas voimakkaasti heijastuneet. Tämä käytös johtuu altaan geometriasta, missä heijastusten vuoksi tietyt pituiset aallot menevät tietyissä pisteissä samaan vaiheeseen (mikä vahvistaa aallokkoa). Lyhyemmät ja pidemmät aallot voivat taas mennä vastakkaiseen vaiheeseen (mikä heikentää aallokkoa). Tämä ilmiö on hyvin nähtävissä myös Rambollin suorittamassa mallikokeessa (Ramboll, 2016), sillä kuvasta 6 (oikea) näkyy miten viiden sekunnin aaltojen vahvistus ja vaimennus altaan perällä on hyvin paikkariippuvainen.

On hyvä muistaa, että vaikka tietty paikka onkin "katvealueessa" kun mallinnetaan tietyn pituisia aaltoja, sisältyy oikeaan aallokkoon aina eripituisia aaltoja. Kokonaistilanne voi siten kuitenkin tarkoittaa vahvistunutta aallokkoa, kuten pisteen 4 mittaukset osoittivat. Ahdinaltaaseen pääsevät tunkeutumaan kaikenpituiset Lauttasaarenselällä mitatut aallot. Mikäli vesisyvyys altaassa on 5 m, ovat aaltojen pituudet noin 6–30 metriä. Pisimmät aallotkin sisältävät huomattavan määrän energiaa ja ne pystyvät liikuttamaan kelluvia rakenteita joiden dimensiot ovat noin aallonpituuden mittaisia tai sitä pienempiä. Aallot Ahdinaltaalla ovat siis kelluvien rakenteiden ja alusten kannalta huomattavasti pahempia kuin esim. Kauppatorilla, missä pisimpien suurienergisten aaltojen pituus jää noin 14 metriin (Kahma *et al.*, 2016).

2.2 Aaltojen harjakorkeus

Yksittäisen aallon tapauksessa voidaan usein olettaa, että puolet aallosta nousee keskivedenpinnan yläpuolelle. Esim. 2 metrin yksittäisen aallon harjakorkeus on siten $z_{max} = 1$ m. Normaaleissa oloissa oletetaan, että suurimman yksittäisen aallon korkeus on noin kaksi kertaa merkitsevä aallonkorkeus, mikä johtaisi tilanteeseen, missä $z_{max} = H_s$. Mikäli aallokkoa on mitattu avoimella alueella, pitää mahdollinen rannan aiheuttama heijastus huomioida



Kuva 6: Mitattu aaltospektri pisteessä 4 (vasen, musta) verrattuna Lauttasaarenselän aaltopoijun spektriin (vasen, punainen). Oikea paneli on otettu Rambollin raportista (Ramboll, 2016), missä 5 sekunnin 180 asteesta tulevien aaltojen heijastusta on mallinnettu.

erikseen. Tässä raportissa esitettyssä tuloksissa ollaan kuitenkin mitattu suoraan heijastunutta aallokkoa, joten tämä ilmiö on jo eksplisiittisesti huomioitu mitatussa merkitsevässä aallonkorkeudessa. On siten odotettavaa, että mitatussa aineistossa $z_{max} \approx H_s$.

Tuloksia tarkastamalla kuitenkin ilmenee, että harjakorkeus nousee paikoitellen huomattavan paljon korkeammalle kuin mitä pelkästään merkitsevistä aallonkorkeudesta voisi päätellä. Ääriesimerkkinä on piste 4, missä suhde $z_{max}/H_s=1.4$. Altaan resonanssi näyttää olevan merkittävä tekijä joka rikkoo oletuksia mitä normaalisti tehdään aallokosta kun sitä tulkitaan satunnaisprosessiksi. Korkeita harjakorkeuksia mitattiin myös muissa pisteissä, myös sellaisissa jossa itse kokonaisvaimennus jäi pieneksi, esim. piste 2 (taulukko 1).

2.3 Maksimiarvojen arviointi

Vaikka tuuli oli mittauspäivänä suhteellisen kovaa, kyse ei kuitenkaan ollut poikkeuksellisesta säästä. Mitattuja arvoja ei siten voida pitää maksimiarvoina mitä voi Ahdinaltaalla esiintyä. Maksimiarvot laskettiin sillä oletuksella, että Lauttasaarenselän merkitsevä aallonkorkeus on 1 m (Kahma *et al.*, 2016). Koska Ahdinaltaalla mitattiin heijastuneita aaltoja käytännössä koko poijuspektrin alueelta, oletettiin tämä osa spektristä nousevan suorassa suhteessa Lauttasaarenselän merkitsevän aallonkorkeuden kanssa. Sitä korkeammat taajuudet oletettiin nousevan tasapainotilaan hyvin kovan tuulen kanssa, mutta tällä korkeataajuisella osalla oli vain pieni vaikutus kokonaisaallonkorkeuden arviointiin.

Arvio maksimiaallonkorkeudelle laskettiin jokaiselle spektrille maksimiarvo, ja näistä suurin otettiin arvioksi jokaiselle pisteelle (kuva 7). Pahimmat paikat merkitsevän aallonkorkeuden suhteen on Melkinlaituri, mihin aallokko pääsee kulkeutumaan melkein vaimentumatta Lauttasaarenselältä. Ahdinaltaan perällä merkitsevä aallonkorkeus jää hieman



Kuva 7: Arvioidut enimmäisarvot merkitsevälle aallonkorkeudelle. Kartta-aineisto haettu sivustolta <https://kartta.hel.fi>.



Kuva 8: Arvioidut enimmäisarvot yksittäisen aallon harjan korkeudelle. Kartta-aineisto haettu sivustolta <https://kartta.hel.fi>.

pienemmäksi, sillä aallot joutuvat kulkeutumaan Melkinlaiturista heijastumalla, jolloin osa aallokon energiasta mahdollisesti tuhoutuu Melkinlaiturin päähän asennettuihin aallonvaimennuskammioihin. Myös itäisen laiturin uloke pienentää Ahdinaltaan päätyyn pääsevää aallokkoa. On huomattavaa, että kaikki nämä arvot ovat kuitenkin suurempia kuin Lauttasaa-rensälän keskelle arvioitu maksimiaallokko. Myös esim. Kauppatoriin verrattuna aallokko on korkeudeltaan 2-3 kertainen (Kahma *et al.*, 2016).

Vaikka arvioitu merkitsevä aallonkorkeus jää Ahdinaltaan nurkissa 1.2 metriin, nousevat yksittäiset aaltojen harjat siellä huomattavasti korkeammalle. Käyttäen hyväksi mitatun harjakorkeuden ja merkitsevän aallonkorkeuden suhdetta, arvioitiin pisteille myös aallon harjan maksimaalinen korkeus häiriintymättömän keskiveden suhteen (kuva 8). Vaikka Melkinlaiturin pisteet on tässäkin suhteessa pahin ($z_{max}=1.9$ m) voi aallon harja Ahdinaltaan nurkassa pisteessä 4 nousta 1.6 metriin. Myös pisteessä 6, joka sijaitsee ensinäkemältä itälaiturilla hieman suojassa, voi yhtenäinen vesimassa nousta 1.3 metriä vedenpinnan yläpuolelle.

Arvoa 1.6 m pisteessä 4 voidaan ottaa kuvastamaan vain sitä pistettä. Silmämääräisesti katsottuna nähtiin, että harjakorkeus vaihtelee Ahdinaltaan perällä hyvin paljon muutamien metrienkin sisällä (kuva 9). Kulmassa murtuvat aallot löivät roiskeita laiturin reunan yli säännöllisesti. Myös pisteessä 4 roiskeita pääsi reunan yli useampaan otteeseen, mutta harvemmin. On siis varauduttava siihen, että kovimpien kelien aikoihin vettä pääsee aaltoilun vaikutuksesta lyömään laiturin reunan yli runsaasti, varsinkin jos keskivesi on samalla korkealla.



Kuva 9: Kuva joka havainnollistaa mille korkeudelle allon harjat ovat nouseet tarkastelemalla seinän kastumista. Kuva on otettu mittauspisteen 4 kohdalta. Kuva: Kimmo Kahma.

2.4 Johtopäätökset

Aallokon heijastumista Ahdinaltaassa mitattiin laiturilta käsin ja mittaustuloksia verrattiin altaan edustalle, Lauttasaarenselälle, ankkuroituun poijuun. Mittauksista näkyy, että aallokko on Ahdinaltaassa voimakkaasti heijastunutta, varsinkin Melkinlaiturilla, missä heijastuskertoimet nousivat jopa 1.8 saakka (2 tarkoittaa täysin heijastunutta aallokkoa). Altaassa mitattu merkitsevä aallonkorkeus oli 0.6-0.8 metriä. Vaikka lounaistuuli oli päivän aikana kovaa, kyseessä oli kuitenkin sää jonka voidaan arvioida toistuvan vuosittain.

Altaassa esiintyviä enimmäisarvoja merkitsevälle aallonkorkeudelle arvioitiin siihen tietoon pohjautuen, että Lauttasaarenselällä suurin esiintyvä merkitsevä aallonkorkeus olisi 1 m. Suurin arvioitu merkitsevä aallonkorkeus oli kaikilla pisteillä korkeampi kuin sisään tuleva yhden metrin suuruinen lähtöaallokko. Mittauspisteistä suurin arvio merkitsevälle aallonkorkeudelle oli Melkinlaiturilla (1.8 m). Aallokon Ahdinaltaalla voidaan siten arvioida olevan korkeampaa kuin Lauttasaarenselällä, ja jopa 2-3 kertainen esim. Kauppatoriin verrattuna. Altaaseen tunkeutui myös jopa 30 metriä pitkiä aaltoja. Tämä on merkittävä kelluville rakenteille ja aluksille, sillä aallot pystyvät liikuttamaan kelluvia esineitä joiden dimensio on pienempiä kuin aaltojen aallonpituus. Vertailun vuoksi voidaan mainita, että Kauppatorille pääsevien pisimpien aaltojen pituus on vain noin 14 metriä.

Yksittäiset aaltojen harjat nousivat mittauksissa merkitsevää aallonkorkeutta korkeammalle, varsinkin Ahdinaltaan perällä. Arviot siitä, miten korkealle yksittäisten aaltojen harjat voivat pahimmilla keleillä nousta vaihtelivat 1.3 ja 1.9 metrin välillä. Silmämääräisesti pystyttiin myös arvioimaan, että altaan perällä mitattu piste ei ollut pahin, vaan harjakorkeudet nousivat huomattavan paljon korkeammiksi lähellä olevilla pisteillä. Tämä johtuu altaan geometrian aiheuttamasta resonanssista, joka voimistaa ja heikentää tietyn pituisia aaltoja tietyissä pisteissä.

Ahdinaltaan aallokko on huomattavasti rajumpaa verrattuna esim. Kauppatoriin. Altaan aallokko on jyrkkien seinien takia vaikea vaimentaa täysin, mutta jos sisääntulevan aallokon korkeutta pystytään rajoittamaan, alentaa se vastaavasti suoraan Ahdinaltaalla esiintyvää aallokkoa.

Viitteet

- BJÖRKQVIST, J.-V., H. PETTERSSON, L. LAAKSO, K. KAHMA, H. JOKINEN ja P. KOSLOFF, 2016. Removing low-frequency artefacts from Datawell DWR-G4 wave buoy measurements. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 5 (1), 17–25.
- BJÖRKQVIST, J.-V., I. VÄHÄÄHO ja K. K. KAHMA, 2017. Spectral field measurements of wave reflection at a steep shore with wave damping chambers. *WIT Transactions on The Built Environment* 170, 185–191. URL <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CC17/CC17018FU1.pdf>. 11.1.2018.
- KAHMA, K. K., J.-V. BJÖRKQVIST, M. JOHANSSON, H. JOKINEN, U. LEIJALA, J. SÄRKÄ, K. TIKKA ja L. TUOMI, 2016. Turvalliset rakentamiskorkeudet Helsingin rannoilla 2020, 2050 ja 2100. URL <https://www.hel.fi/static/kv/turvalliset-rakentamiskorkeudet.pdf>. Online. 12.2.2019.
- RAMBOLL, 2016. Ahdinallas, Aaltomalli. *Tekninen raportti*. Laatiija: Thomas Banafa, Tarkastaja: Tommy Nyman.